Circadiane Periodik psychologischer und physiologischer Parameter bei Schlafentzug

Christoph Ringer

1972

Aus dem Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie
in Erling-Andechs

Direktor: Professor Dr.med. Jürgen Aschoff

Circadiane Periodik psychologischer und physiologischer Parameter bei Schlafentzug

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Christoph Ringer
aus Nürnberg

München 1972

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. J. Aschoff
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. K. Kramer
Dekan:	Prof. Dr. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 21.12.72

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Herrn Professor Jürgen Aschoff und seinen Mitarbeitern danke ich für die Anregung, Kritik und Unterstützung dieser Arbeit.

DISSERTATIONS – und FOTODRUCK FRANK oHG
8000 München 2 · Gabelsbergerstr. 15 · Tel.: 2 80 90 90

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Einleitung		
1.	Methodik	1
1.1.	Versuchsanordnung und Zeitplan	2
1.2.	Meßgrößen	3
1.3.	Ablauf eines Testtermines	8
1.4.	Behandlung der Meßwerte	9
2.	Ergebnisse	10
2.1.	Absolutwerte und interindividueller Vergleich	10
2.2.	Tagesgänge der normierten Werte	14
2.3.	24-Stunden-Gleichwerte	21
2.4.	Vergleich der drei Versuchsbedingungen $(LD)_1$, (LL) und $(LD)_2$	22
3.	Diskussion	27
3.1.	Interindividuelle Streuung der Leistung, Leistungsabfall und Erholung	27
3.2.	Circadiane Periodik	29
3.3.	Phasenlage der Periodik	31
3.4.	Ursachen der circadianen Periodik psychologischer Leistungen	34
4.	Zusammenfassung	38
5.	Tabellen	39
6.	Literaturverzeichnis	41

Einleitung

Seit Ende des letzten Jahrhunderts sind zahlreiche Versuche über den Einfluß von Schlafentzug auf verschiedene physiologische Funktionen und psychologische Leistungen durchgeführt worden (24, 25, 26, 29, 31, 36, 42, 49). Das Hauptinteresse der Untersucher galt Änderungen der Tagesmittelwerte während und nach mehrtägiger Schlaflosigkeit, nicht so sehr den tageszeitlichen Veränderungen. Wenn auch die Ergebnisse häufig eine Tagesperiodik erkennen ließen (30, 32, 34, 35, 36), so wurde diese nicht selten lediglich als Störfaktor betrachtet. Erst in neuerer Zeit hat die Forschung auf diesem Gebiet die Tagesperiodik physiologischer und psychologischer Parameter unter Schlafentzug selbst zum Ziel der Untersuchungen gemacht (26, 34, 35). Versuche über Schlafentzug wurden jedoch selten mit einer größeren Anzahl von VPn. und unter vollständiger Ausschaltung periodischer Umwelteinflüsse durchgeführt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung einiger psychologischer Parameter bei Schlafentzug unter besonderer Berücksichtigung tageszeitabhängiger Veränderungen und unter kontrollierten Umweltbedingungen.

1. Methodik

1.1. Versuchsanordnung und Zeitplan

Die Versuche wurden in einer unterirdischen, von Umwelteinflüssen weitgehend abgeschirmten Experimentieranlage durchgeführt (47). Von zwei miteinander verbundenen Räumen (jeder mit ca. 20 qm Bodenfläche, dazu Küche und Bad) war einer zum Wohnen und Schlafen eingerichtet, im anderen wurden die Tests durchgeführt. Die Räume waren voll klimatisiert mit einer konstanten Temperatur von 21 Grad Celsius und 40% Luftfeuchtigkeit. Licht erhielten sie von einer gleichmäßig beleuchteten Deckenfläche, zusätzlich standen drei Leselampen zur Verfügung. Zwölf männliche Versuchspersonen im Alter von 20 bis 25 Jahren (zehn Studenten und zwei Arbeiter) wurden in vier Gruppen zu je 3 VPn. eingeteilt. Jede Gruppe hielt sich acht Tage lang in den Versuchsräumen auf und wurde während dieser Zeit alle drei Stunden getestet. Die VPn. waren daher, trotz Isolierung von der Umwelt, über die Uhrzeit informiert. In der Zeit zwischen den Tests konnten sich die VPn. nach Belieben beschäftigen, jedoch waren die Schlafzeiten genau festgelegt.

Während der Schlafentzugszeit hielt sich ständig ein Versuchsleiter bei der Gruppe auf, um diese aufzumuntern und den Wachzustand zu kontrollieren. Coffein oder andere Stimulantien standen den VPn. nicht zur Verfügung. Die VPn. hielten sich während der gesamten Versuchsdauer (acht Tage) nur innerhalb der Versuchsräume auf.

Die VPn. lebten während des Versuchsabschnittes, in dem sie schlafen durften, in einem künstlichen Licht-Dunkel-Wechsel mit 15,5 Stunden Lichtzeit und 8,5 Stunden Dunkelzeit, die (mit Ausnahme einer Nacht) zweimal für eine halbe Stunde durch Licht unterbrochen wurde. Innerhalb von 24 Stunden wurden die VPn. acht mal getestet, nachts wurden sie hierzu zweimal geweckt (Abb. 1).

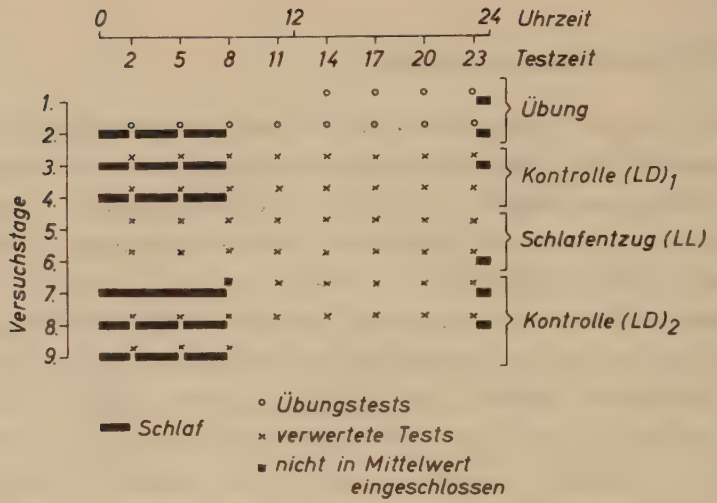

Abb. 1

Versuchsplan mit Angabe der Testtermine und der Schlaf- und Wachzeiten. LD (Licht-Dunkel-Wechsel) = normaler Tagesablauf mit Schlafen und Wachen; LL (Dauerlicht) = Schlafentzugsperiode.

Für jede Gruppe begann die Versuchsserie mit eineinhalb Übungstagen, in denen sich die drei VPn. an die Lebensbedingungen in den Versuchsräumen gewöhnen und eine Routine in der Abwicklung der Tests gewinnen konnten. Es folgten zwei Kontrolltage mit je 7,5 Stunden Schlaf im Dunkeln, anschliessend die Wachperiode im Dauerlicht über 63,5 Stunden. In der dann folgenden Dunkelzeit wurde nicht getestet, sodaß die VPn. 8,5 Stunden durchschlafen konnten. Den Schluß jeder Versuchsserie bildeten zwei weitere Kontrolltage mit zweimaligem Wecken pro Dunkelzeit. Um den Einfluß einer Erwartungshaltung der VPn. gegen Ende der Schlafentzugsperiode möglichst gering zu halten, wurde den VPn. eine falsche Information über den Versuchsplan gegeben. Die VPn. nahmen an, daß sie nicht zwei, sondern drei Nächte wach bleiben müßten und die Versuchsserie neun, statt acht Tage

dauern würde. (Im folgenden Text werden die ersten zwei Kontrolltage mit Schlafen und Wachen und Licht-Dunkel-Wechsel als $(LD)_1$, die Schlafentzugszeit mit Dauerlicht als (LL), die zwei Kontrolltage am Ende der Versuchsserie als $(LD)_2$ bezeichnet.)

1.2. Meßgrößen

1.2.1. Reaktionszeit

Diese wurde mit einem Reaktionszeitmeßgerät (Zak) gemessen. Es bestand aus einer Displaystufe mit 5 verschiedenfarbigen Lichtern (grün, rot, blau, gelb, weiß) und 5 entsprechenden Tasten, zusätzlich einer Steuer- und Meßstufe, die sich außerhalb des Meßraumes befand. (Um eine Reaktion auf rein optische Reize zu gewährleisten, war eine räumliche Trennung der Display- von der Steuerstufe notwendig, da das Ein- und Ausschalten der Relais ein Geräusch verursachte). Die Steuerstufe erlaubte die Einstellung der Dauer, des zeitlichen Abstandes und der Reihenfolge der 5 verschiedenfarbigen Lichtreize. Reizabstand und Verteilung der einzelnen Farben war zufällig. Bestimmt wurden sie durch Filmstreifen, die für jeden Versuch verschieden waren. Innerhalb von 140 Sekunden wurden 90 Reize geboten. Der mittlere Reizabstand betrug ca. 1,5 Sekunden. Die Reizdauer wurde auf 0,75 Sekunden eingestellt. Eine elektronische Uhr maß die summierte Reaktionszeit für 90 Reize, ein Zähler registrierte die Gesamtzahl und die Zahl der richtigen Reaktionen (Tastendruck innerhalb der Reizdauer von 0,75 Sek. auf die der Farbe entsprechenden Taste).
Anweisung an die VP: Drücken sie so schnell wie möglich mit der dominanten Hand auf die der Farbe entsprechende Taste.

1.2.2. Durchstreichtest

Der in der Psychologie als D_2-Durchstreichtest bekannte Test eignet sich wegen seiner geringen Variationsmöglichkeit nicht zur mehrmaligen Wiederholung. Für die speziellen Bedingungen dieser Versuchsserie wurde ein Zif-

ferndurchstreichtest entwickelt. Als Durchstreichvorlage diente ein Teil eines Pauli-Rechenbogens mit ca. 1000 Ziffern (von 1 bis 9), die in zufälliger Reihenfolge in Spalten angeordnet waren. Die Ziffern 2 bis 9 waren in gleicher Häufigkeit vertreten. Die VPn. hatten jeweils drei von diesen Ziffern durchzustreichen, die von Test zu Test variiert wurden. In Vorversuchen hatte sich die Tendenz gezeigt, daß bestimmte Ziffernkombinationen wie etwa 2, 3, 4 oder 3, 6, 9 leichter erkannt wurden als beispielsweise 2, 5, 9 oder 3, 7, 8. Nach diesen Erfahrungen wurden die leichtesten Kombinationen ausgewählt und nur für die Übungstests verwendet. Um einen weiteren Unterschied im Erkennen der verbliebenen Ziffernkombinationen auszugleichen, erhielten die 12 VPn. nach einem bestimmten System zu demselben Testtermin immer 12 verschiedene Ziffernkombinationen. Aus den Ziffern 2 bis 9 lassen sich 57 verschiedene Gruppen zu je 3 Ziffern zusammenstellen, sodaß sich eine hinreichend große Anzahl von nahezu gleichwertigen, verschiedenen Kombinationen ergibt. Gemessen wurde die Anzahl von Ziffern, die in der Zeit von 3 Minuten kontrolliert wurden.
Anweisung an die VP.: Kontrollieren sie in der vorgeschriebenen Zeit so schnell wie möglich die Ziffernspalten und streichen sie die angegebenen Ziffern durch.

1.2.3. Einfache Rechenleistung

Diese wurde mit einem automatisierten Pauli-Rechentest gemessen. Auf dem Sichtfeld des Pauli-Rechenapparates (Zak) erschienen 2 einstellige Zahlen, die addiert werden sollten. Die Zahlen wurden durch elektronische Zufallsgeneratoren bestimmt. Eine Tastatur diente zum Eingeben der Ergebnisse. Sobald eine Taste gedrückt wurde, erschienen die nächsten beiden Zahlen. Die VP. schaltete das Gerät selber ein, nach 3 Minuten schaltete es sich automatisch wieder aus. Registriert wurde die Anzahl der richtigen und die der falschen Rechnungen, die in 3 Minuten durchgeführt wurden.
Anweisung an die VP.: Addieren sie so schnell und so richtig wie möglich die dargebotenen Zahlen.

1.2.4. Rechenleistung mit Entscheidung

Aus der Form A und B, Schwierigkeitsstufe D des Konzentrationsleistungstests nach Lienert (KLT) mit 500 Aufgaben wurden zu jedem Testtermin 20 Aufgaben vorgelegt. In der zweiten Hälfte der Versuchsserie wiederholten sich die Aufgaben je einmal, was bei der relativ komplexen Aufgabenstellung dieses Tests vertretbar erschien. Da drei VPn. nicht gleichzeitig von einem Versuchsleiter gemessen werden konnten, lösten die VPn. selber ihre Stopp-Uhren aus, begannen zu rechnen, und stoppten die Uhr nach Beendigung der letzten Aufgabe. Gemessen wurde die Zeitdauer, die zur Lösung der 20 Aufgaben benötigt wurde und die Anzahl von Fehlern.
Anweisung an die VP.: Rechnen sie so schnell und so richtig wie möglich die vorgelegten 20 Aufgaben.

1.2.5. Maximale Tipp-Geschwindigkeit

Zur Messung dieser Größe betätigten die VPn. eine Art Morsetaste, deren Impulse von einem Zähler registriert wurden. Die Zähldauer betrug 10 Sekunden. Um während des "steady states" der Tippgeschwindigkeit zu messen, wurde der Zähler automatisch erst 5 Sekunden nach Tippbeginn ein- und 2 Sekunden vor dem Signal "Stop" ausgeschaltet.
Anweisung an die VP.: Tippen sie so schnell wie möglich mit dem Mittelfinger der dominanten Hand auf die Taste. Die Handwurzel soll dabei auf der Unterlage ruhen.

1.2.6. Bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit

Diese wurde mit derselben, eben beschriebenen Versuchsanordnung bestimmt. Die Zähldauer betrug ebenfalls 10 Sekunden.
Anweisung an die VP.: Tippen sie in einer gleichmäßigen, ihnen angenehmen Geschwindigkeit auf die Taste.

1.2.7. Zeitintervall-Schätzung

Diese Fähigkeit wurde mit einer einfachen elektrischen Stoppuhr mit einer Genauigkeit von 0,1 Sek. geprüft. Durch Tastendruck wurde die Stoppuhr gestartet bzw. gestoppt. Während des geschätzten Zeitintervalls leuchtete eine Kontrollampe. Vor Beginn der Versuchsserie wurde von jeder VP. das Schätzen eines 10-Sekunden-Intervalls zwanzigmal geübt, wobei die VPn. selber die Fehlergröße kontrollierten. Da die meisten Probanden beim Schätzen eines Zeitintervalls von mehreren Sekunden unwillkürlich beginnen zu zählen, wurde bewußt folgende
Anweisung an die VP. gegeben: Schätzen sie dreimal mit Hilfe des Zählens die Dauer von zehn Sekunden.

1.2.8. Selbsteinschätzung

Vor jedem Testtermin wurden die VPn. nach der subjektiven Einschätzung ihrer augenblicklichen Verfassung gefragt. Der Fragebogen (Abb. 2) enthielt zehn verschiedene Items.

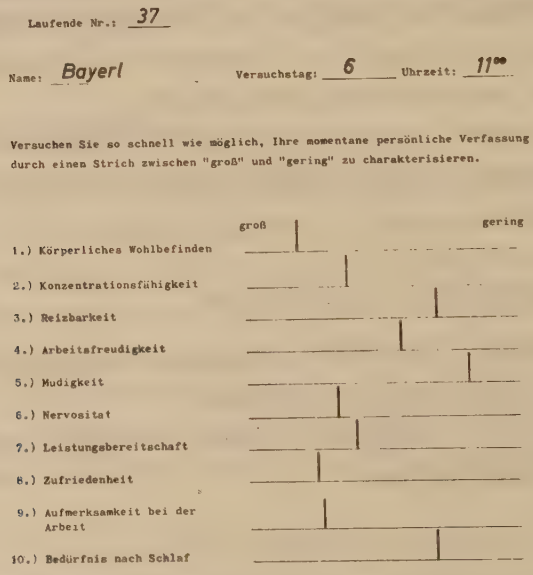

Abb. 2
Fragebogen zur Selbsteinschätzung der VPn., der zu jedem Testtermin vorgelegt worden ist. (Als Beispiel ausgefüllt von VP. 4 zum Testtermin 37).

Durch eine Markierung auf der Strecke zwischen "groß" und "gering" sollten die einzelnen Items bewertet werden. Es wurden überwiegend jeweils zwei auf Ähnliches zielende Fragen gestellt, um eine Kontrolle über die Validität der Beantwortung zu erhalten. Um eine nicht inhaltbezogene Tendenz im Markieren des Fragebogens zu vermeiden, wurde die Reihenfolge der Fragen so gewählt, daß solche gleichen Inhalts und gleichartiger Beantwortungsrichtung nicht aufeinander folgten.
Anweisung an die VP.: Versuchen sie so schnell wie möglich, ihre momentane persönliche Verfassung durch einen Strich zwischen "groß" und "gering" zu charakterisieren.

1.2.9. Körpertemperatur

Die Rectaltemperatur wurde während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich mit einem Widerstandsthermometer gemessen. Der Thermofühler war über ein Kabel, das eine freie Beweglichkeit in allen Versuchsräumen erlaubte, mit dem außerhalb der Versuchsräume befindlichen Registriergerät verbunden.

1.2.10. Urinmenge und Elektrolytkonzentration

Die VPn. wurden aufgefordert, vor jedem Testtermin eine Urinprobe abzugeben. Die Konzentrationen an Kalium, Natrium und Calcium des Urins wurden flammen-photometrisch bestimmt.

Unter den 10 gemessenen Parametern waren bei vier psychologischen Leistungstests und einem motorischen Leistungstest maximale Geschwindigkeit gefordert. Neben der Selbsteinschätzung sollten die bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit und die Zeitintervallschätzung indirekt Auskunft über das subjektive Befinden der VPn. geben. Das aus anderen Versuchen bereits bekannte Verhalten der physiologischen Parameter diente als Kontrollgröße.

1.3. Ablauf eines Testtermines

Der Test wurde angekündigt, beziehungsweise die VPn. geweckt. Die VPn. wurden aufgefordert eine Urinprobe abzugeben. Danach begab sich VP. 1 in den Testraum. Der Versuchsleiter hielt sich im Vorraum auf, um die Kontroll- und Signalgeräte zu bedienen. Anweisungen des Versuchsleiters erfolgten allein über Lichtsignale, um eine möglichst ungestörte und gleichbleibende Durchführung der Tests zu gewährleisten. Der erste Teil der Testbatterie wurde von den drei VPn. einer Gruppe einzeln und nacheinander in folgender Reihenfolge durchgeführt:

1. Fragebogen
2. Reaktionszeittest
3. Bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit
4. Maximale Tipp-Geschwindigkeit
5. Pauli-Rechentest
6. Zeitintervall-Schätzung

Den zweiten Teil der Testbatterie führten alle drei VPn. gleichzeitig in Anwesenheit des Versuchsleiters durch:

7. Konzentrationsleistungstest (KLT)
8. Ziffern-Durchstreichtest

Für alle Testtermine wurde dieselbe Test- und Versuchspersonenreihenfolge beibehalten. Die Zeit zwischen Ankündigung und Beendigung des letzten Tests betrug je nach Tageszeit und Befinden der VPn. 20 bis 30 Minuten. Besondere Aufmerksamkeit wurde der genauen Reproduzierbarkeit der äußeren Versuchsbedingungen gewidmet. Dies wurde durch eine weitgehende Automatisierung und Standardisierung der Testverfahren und Anweisungen erreicht. Die VPn. saßen zu jedem Testtermin an demselben Arbeitsplatz und benutzten dasselbe Schreibgerät. Die Versuchsleiter waren ebenfalls bestrebt, ihr Verhalten in Anwesenheit der VPn. zu standardisieren. Die Testdurchführung wurde zu Beginn der Versuchsserie genau erklärt, im späteren

Verlauf jedoch keine Bemerkungen mehr dazu gemacht. Die Versuchspersonen wurden weder über ihre eigene noch über die Leistung anderer VPn. informiert.

1.4. Behandlung der Meßwerte

Um die verschiedenen Parameter besser vergleichen zu können, wurden alle Meßergebnisse in eine einheitliche Dimension umgewandelt. Sofern nicht bereits die Testmethode eine Geschwindigkeitsmessung verlangte, wurden die Meßwerte in die entsprechende Dimension umgerechnet. Geschwindigkeit bedeutet bei den Rechentests: Gelöste Aufgaben pro Zeiteinheit. Um bei der Zeitintervall-Schätzung einen Kurvenverlauf zu erhalten, der den übrigen Parametern entspricht, wurde der Kehrwert der geschätzten Zeit (1/sec) gebildet, sodaß eine Größe entstand, die man als "Geschwindigkeit des Zeitempfindens" bezeichnen könnte. Zur Auswertung des Fragebogens wurde die Strecke zwischen "gering" und "groß" in neun gleiche Abschnitte geteilt und jeder Markierung der entsprechende Wert von eins bis neun zugeteilt. Dabei wurde die Richtung der Skalierung der einzelnen Items so gewählt, daß positive Selbsteinschätzung einen hohen, negative einen niedrigen Wert erhielt. Für die Untersuchung periodischer Veränderungen von Parametern sind deren intraindividuelle Schwankungen, nicht jedoch die interindividuellen Unterschiede im durchschnittlichen Testergebnis der 12 VPn. relevant. Aus diesem Grund wurden die absoluten Meßwerte der psychologischen Parameter normiert. Die absoluten Werte wurden dabei auf den Mittelwert (= 0%) aller Testergebnisse über sechs Versuchstage der jeweiligen VP. bezogen. Da die physiologischen Parameter keine so große interindividuelle Streuungsbreite aufweisen, wurden hier die absoluten Meßwerte zur weiteren Auswertung verwendet.

2. Ergebnisse

2.1 Absolutwerte und interindividueller Vergleich

Die Absolutwerte der verschiedenen Parameter gemessen an einer einzelnen VP. zeigen die Abbildungen 3, 4 und 5.

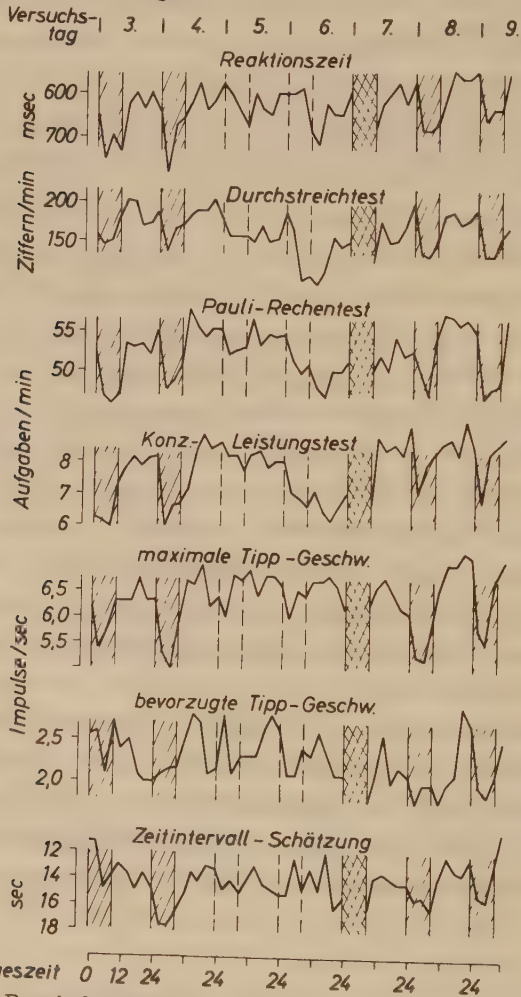

Abb. 3 Psychologische Paramter. Absolutwerte gemessen an einer einzelnen VP.. Dunkelzeiten sind durch senkrecht durchgezogene Striche abgegrenzt; diejenigen mit zweimaliger Unterbrechung zur Testdurchführung sind einfach, diejenige ohne Unterbrechung doppelt schraffiert. Die entsprechenden Zeitabschnitte während der Schlafentzugsperiode (5. und 6.Versuchstag) sind mit unterbrochenen senkrechten Strichen gekennzeichnet.

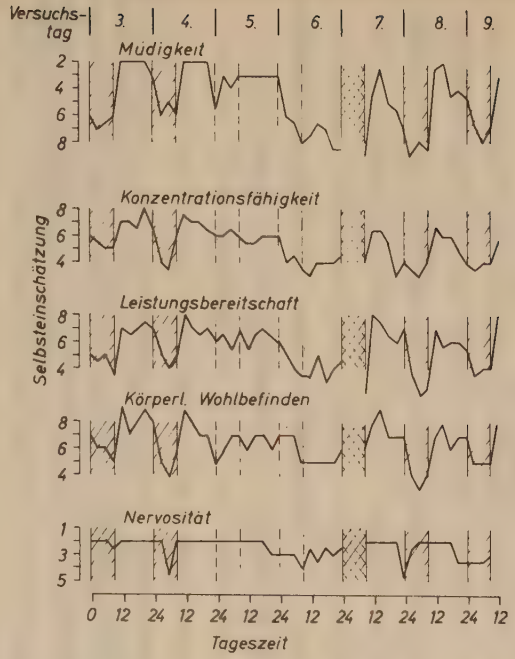

Abb. 4

Selbsteinschätzung. Bewertung von fünf Items des Fragebogens durch eine einzelne VP.. Auf der Ordinate sind die entsprechenden Werte der nachträglich in neun gleiche Abschnitte eingeteilten und mit den Zahlen eins (gering) bis neun (groß) bezeichneten Skalen des Fragebogens angegeben. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

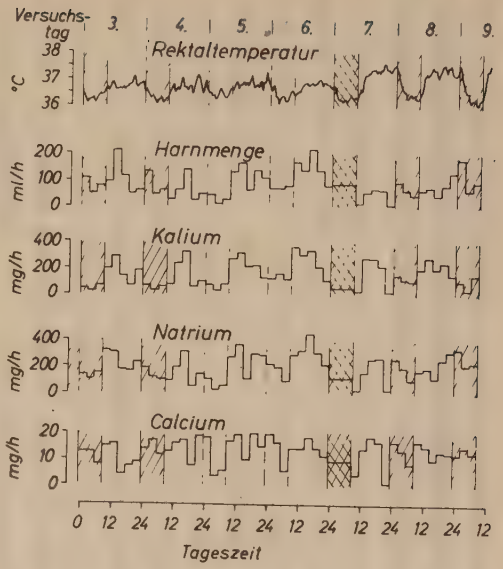

Abb. 5

Physiologische Parameter. Absolutwerte gemessen an einer einzelnen VP.. Der Verlauf der Rektaltemperatur ist kontinuierlich registriert worden. Harn- und Elektrolytmengen sind in dreistündigem Abstand gemessen worden und als Menge pro Stunde angegeben. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

Die Schlafzeiten sind durch senkrecht durchgezogene Striche abgegrenzt und schraffiert. Trotz starker Schwankungen einzelner Werte an aufeinanderfolgenden Meßpunkten läßt sich, auch ohne die Methoden der Statistik anzuwenden, bei fast allen Parametern eine Tendenz zu periodisch wiederkehrendem Anstieg und Abfall der Kurven erkennen. Eine ausgeprägte Periodik zeigt sich besonders an den Kontrolltagen. Doch auch während der Zeit ohne Schlaf ist diese bei den ersten drei psychologischen Leistungstest und bei den physiologischen Parametern zu sehen, weniger deutlich bei dem Konzentrationsleistungstest und der Zeitintervall-Schätzung. Die Selbsteinschätzung dagegen scheint unter Schlafentzug in den Ergebnissen einer einzelnen VP. keine Periodik mehr aufzuweisen. Die relativ großen Zacken in der Temperaturkurve sind durch gymnastische Übungen bedingt, die von dieser VP. zum Ausgleich der Bewegungseinschränkung während der acht Versuchstage durchgeführt worden sind. Die Einzelkurven der übrigen VPn. ergeben ein ähnliches Bild.

Abbildung 6 zeigt die mittleren individuellen Leistungen der 12 VPn. in den einzelnen Tests, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert (= 0%) aller VPn. über sechs Versuchstage (ausgenommen sind die 1,5 Übungstage) des jeweiligen Tests (Tab. 1). Die zu der interindividuellen Leistungsverteilung errechnete Standardabweichung (senkrechte Balken) beträgt bei der Reaktionszeit $\pm$ 8,4%, beim Durchstreichtest $\pm$ 14,0%, beim Pauli-Rechentest $\pm$ 11,8% und beim Konzentrationsleistungstest $\pm$ 20,6%. Die Streuung der maximalen Tipp-Geschwindigkeit mit s = $\pm$ 12,6% entspricht der bei den psychologischen Leistungstests. Die bei der Zeitintervall-Schätzung von einzelnen VPn. im Mittel geschätzten Werte reichen von ca. 7 bis 13 Sekunden (s = $\pm$ 13,1%). Besonders auffällig ist die große interindividuelle Variationsbreite der bevorzugten Tipp-Geschwindigkeit. Die Standardabweichung beträgt hierbei $\pm$ 36,7%. Die VP. mit der schnellsten bevorzugten Tipp-Geschwindigkeit tippte im Durchschnitt dreimal so schnell wie die mit der langsamsten. Bei der Selbsteinschätzung streute die Konzentrationsfähigkeit mit s = $\pm$ 24,2% relativ stark, die Müdigkeit mit s = $\pm$ 12,1% nur wenig. Abbildung 6 macht

deutlich, warum eine Normierung der psychologischen Testergebnisse durch Umrechnung der Absolutwerte in prozentuale Abweichungen vom 24-Stunden-Mittel, wie in 1.4. der Methodik beschrieben, zweckmäßig ist.

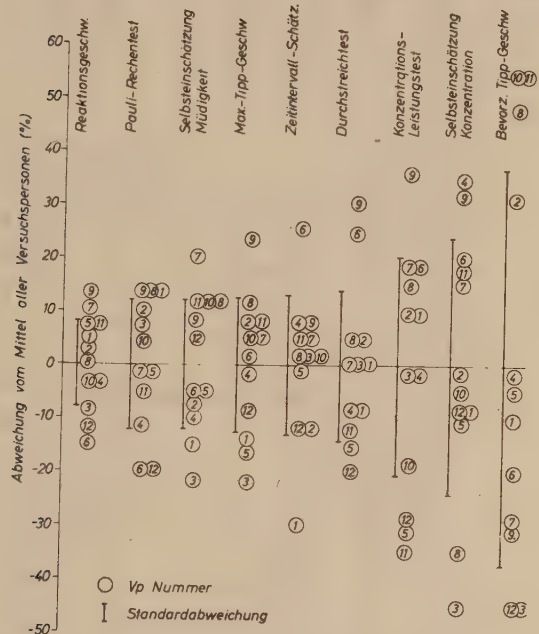

Abb. 6
Mittlere individuelle Leistungen der VPn. 1 bis 12 in den einzelnen Tests, dargestellt als Abweichung vom Mittelwert (= 0%) aller VPn. in den jeweiligen Tests. Die Parameter sind von links nach rechts mit zunehmender interindividueller Streuung angeordnet.

2.2. Tagesgänge der normierten Werte

Zu jedem Testtermin ist aus den normierten individuellen Meßwerten der entsprechende Mittelwert und die Standardabweichung über alle 12 VPn. errechnet worden. Die Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen den Verlauf der Mittelwertskurven über sechs Versuchstage (ausgenommen sind die 1,5 Übungstage). Die Standardabweichung ist als Hüllkurve dargestellt. Diejenige Dunkelzeit, in der nicht gemessen worden ist, bleibt im Kurvenverlauf frei. Die Kurven der vier psychologischen Leistungstests (Abb. 7) sind in ihrem Verlauf sehr ähnlich.

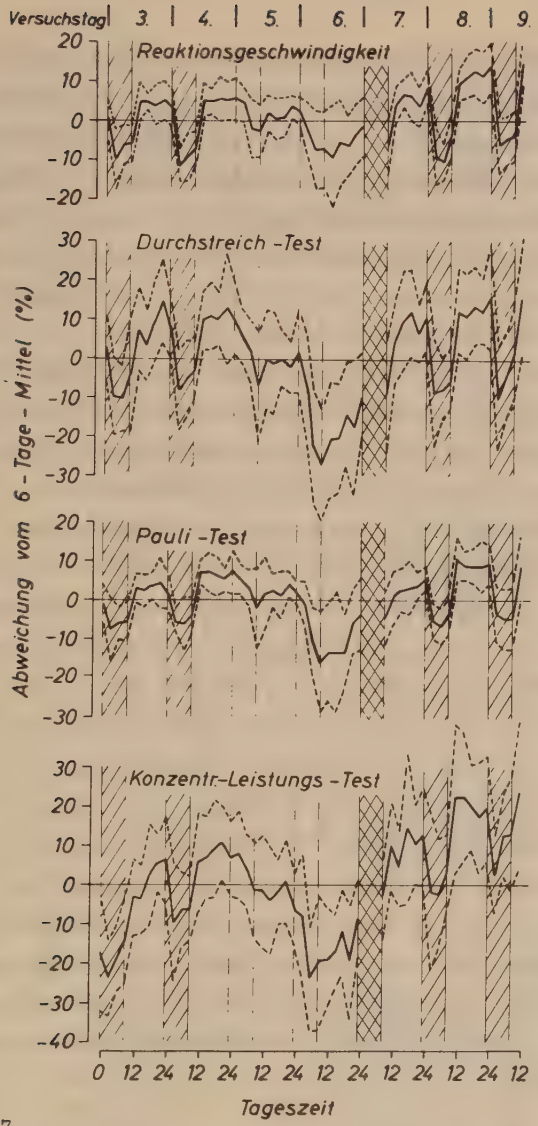

Abb. 7

Psychologische Leistungstests. Die durchgezogene Kurve (——) stellt die Mittelwerte der normierten Meßwerte von 12 VPn. als Abweichung vom Sechs-Tage-Mittel (= 0%) dar. Die unterbrochene Hüllkurve (----) gibt die entsprechende Standardabweichung an. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

Die Ergebnisse der Reaktionszeitmessung, des Durchstreichtests und des Pauli-Rechentests sind untereinander hoch korreliert, r = + 0,9 (Tab. 2), der Konzentrationsleistungstest ist mit r = + 0,8 zu den eben genannten etwas geringer korreliert. Alle Parameter zeigen in Abhängigkeit von der Tageszeit einen periodisch wiederkehrenden Anstieg und Abfall. Die Dauer der geringsten Leistung während der Nacht ist relativ kurz (von 2 bis 5 Uhr), während die Leistungen am Tag gegen 11 Uhr ein Plateau erreichen, das bis ca. 23 Uhr gehalten wird. Der tägliche Leistungsabfall ist in der Regel steiler als der Leistungsanstieg. Abgesehen von diesem durchgehenden Tagesgang erlangen die VPn. in den ersten Versuchstagen eine zunehmende Übung in der Durchführung der gestellten Aufgaben. Daraus ergibt sich ein in den ersten Tagen für die verschiedenen Tests unterschiedlicher Übungstrend, dessen Werte nicht in die weitere Auswertung einbezogen worden sind. Nach ca. 12 Testdurchgängen erreichen die Testergebnisse am dritten Versuchstag ein annähernd gleichbleibendes 24-Stunden-Niveau. Nur beim KLT-Test macht sich noch ein Anstieg des Kurvengleichwertes über diese Zeit hinaus bemerkbar. Während der Schlafentzugszeit (LL) weisen die Ergebnisse aller Tests auf einen mehr oder weniger starken Leistungsabfall hin. Die Abhängigkeit von der Tageszeit zusammen mit der stetigen Abnahme der mittleren Leistung ergibt hier einen stufenförmigen Verlauf der Kurven. Während die Tagesleistungen des ersten LL-Tages nur wenig über den Nachtleistungen des vorherigen Tages liegen, steigen die Leistungen am darauf folgenden Tag wieder stark an, ohne daß den VPn. bekannt gewesen ist, daß in der anschließenden Nacht nicht getestet würde. Der Verlauf der Kurven an den letzten beiden Tagen $(LD)_2$ zeigt wieder ein ähnliches Bild wie an den ersten beiden Tagen $(LD)_1$. Für die Schwingungsbreite der einzelnen Parameter siehe Tabelle 1.

Die Fehlerquote bei den Rechentests korreliert nicht mit der Rechengeschwindigkeit. Der Korrelationskoeffizient über den gesamten Versuch beträgt für den Pauli-Rechentest + 0,01, für den Konzentrationsleistungstest + 0,13. Schlüsselt man jedoch die Korrelation für den Pauli-Rechentest nach den unterschiedlichen Versuchsbedingungen auf, so ist für $(LD)_1$ r =

+ 0,24, für $(LD)_2$ r = + 0,5, während sich im (LL) das Vorzeichen umkehrt, r = - 0,54. Die Standardabweichung ist während des gesamten Versuches nur geringen Schwankungen unterworfen, die keinen Zusammenhang mit der Tageszeit erkennen lassen. Eine Ausnahme stellt der zweite LL-Tag dar, an dem die Standardabweichung bei allen psychologischen Leistungstest um ca. +5% ansteigt. für die mittlere Standardabweichung der einzelnen Tests siehe Tabelle 1.

Der Kurvenverlauf der maximalen Tipp-Geschwindigkeit (Abb. 8) zeigt ein ähnliches Bild wie der der psychologischen Leistungstest.

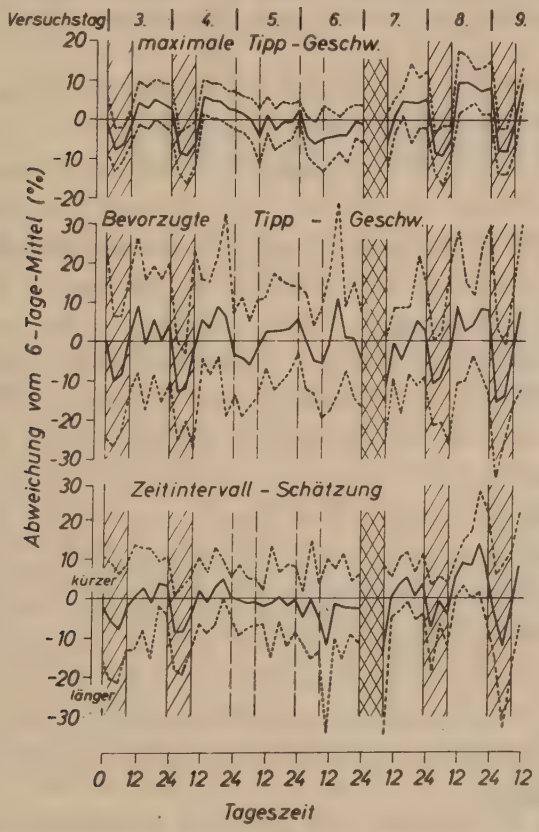

Abb. 8
Motorische und psychologische Tests. Mittelwert von 12 VPn. (——) und Standardabweichung (----) der normierten Meßwerte. Vgl. Abb. 3 und 7.

Jedoch ist die Schwingungsbreite geringer und die Leistung fällt während der LL-Tage nur mäßig ab. Die bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit ist ebenfalls von der Tageszeit abhängigen Schwankungen unterworfen. Während der LL-Tage verlangsamt sie sich nicht und zeigt auch keine Verminderung der Schwingungsbreite gegenüber den LD-Tagen. Der Verlust der Korrelation zu den Leistungstests während der LL-Zeit (Tabelle 2) ist noch zusätzlich dadurch zu erklären, daß am zweiten LL-Tag die bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit dort einen Gipfel erreicht, wo die Werte der Leistungstests am niedrigsten sind. Die Standardabweichung beträgt im Mittel ca. 14%. Die Zeitintervall-Schätzung zeigt unter LD-Bedingung eine Periodizität (41), ist jedoch an den LL-Tagen nur mehr zufälligen Schwankungen unterworfen.

Entsprechend den objektiven Tests weisen fast alle Selbsteinschätzungen unter LD-Bedingung eine Periodizität auf. Sehr unterschiedlich ist die Schwingungsbreite der einzelnen Items. Sie reicht von 30% bei Reizbarkeit bis zu 118% bei Müdigkeit. Ebenso unterscheiden sie sich in ihrem Kurvenverlauf unter LL-Bedingung. Während bei Müdigkeit und Konzentrationsfähigkeit noch eine Abhängigkeit von der Tageszeit angedeutet ist, was aus der relativ hohen Korrelation mit dem Leistungstest (Tabelle 2) ersichtlich ist, sinkt die Bewertung der übrigen Items gleichmäßig ab. Aus den Absolutwerten der Selbsteinschätzung, ergibt sich, daß die Bewertung von Müdigkeit und Konzentrationsfähigkeit um die Mitte der Bewertungsskala schwankt, Arbeitsfreudigkeit und Leistungsbereitschaft zum Negativen tendieren, während im Mittel die VPn. ihr körperliches Wohlbefinden, ihre Zufriedenheit, Nervosität und Reizbarkeit ausschließlich im positiven Bereich der Bewertungsskala markiert haben. Itempaare ähnlichen Inhaltes liegen in ihrer mittleren Bewertung nicht nur sehr nahe beieinander, sondern sind auch in ihrem Kurvenverlauf hoch korreliert. Die Bewertung der Itempaare 5/10, 2/9 und 4/7 (s. Abb. 2) ist nahezu identisch. Die Korrelationskoeffizienten liegen alle über +0,95. Abbildung 9 zeigt den Kurvenverlauf der subjektiven Einschätzung von Müdigkeit und Konzentrationsfähigkeit.

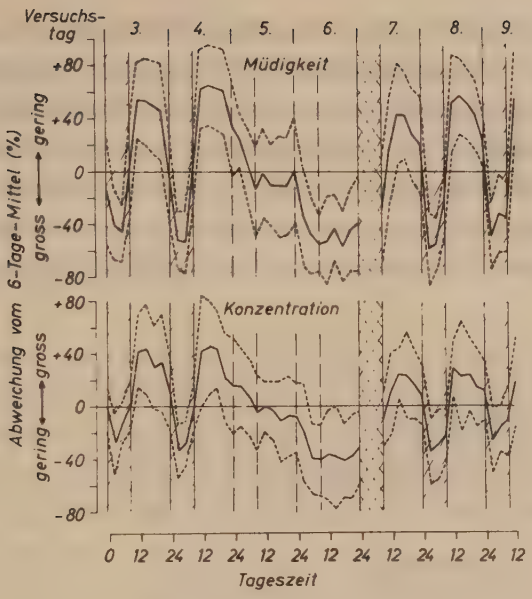

Abb. 9
Selbsteinschätzung der Müdigkeit und Konzentrationsfähigkeit. Mittelwert von 12 VPn. (———) und Standardabweichung (----). Vgl. Abb. 3 und 7.

Zur besseren Übersichtlichkeit dieser Kurven wurde für die Ordinate ein Maßstab gewählt, der sich wie 1:3 zu dem Maßstab der bisher beschriebenen Abbildungen verhält. Im Unterschied zu den übrigen Parametern bildet sich im Kurvenverlauf kein Tagesplateau aus, sondern die positive Bewertung der eigenen Verfassung erreicht einen Gipfel um die Mittagszeit, um dann früher und stärker als die objektive Leistung abzufallen. Ebenso extrem sinkt die Selbsteinschätzung während der Schlafentzugszeit ab und erreicht Werte, die weit unter den objektiven Testergebnissen liegen. Dennoch zeigt sich auch hier gegen Ende des zweiten LL-Tages eine Tendenz zu erneut positiver Einschätzung der eigenen Verfassung. Im Gegensatz zu den übrigen Testergebnissen weist hier die Standardabweichung als Maß der interindividuellen Streuung eine Periodizität auf. Bei einer mittleren Standardabweichung von $\pm$ 30% sinkt diese regelmäßig nachts auf Werte um $\pm$ 20% ab und steigt tagsüber auf Werte um $\pm$ 40% an.

Die Rektaltemperatur, deren Verlauf in Abbildung 10 dargestellt ist, zeigt während der gesamten Versuchsserie eine klare "circadiane Periodik", wie sie bereits von anderen Autoren (2, 9, 28) beschrieben worden ist. Abweichend von dem bekannten Bild der Temperaturkurve sieht man in Abbildung 10 während der Schlafzeiten kurzfristige Temperaturausschläge von ca. 0,1 Grad Celsius, die durch Unterbrechnungen des Schlafes zur Testdurchführung bedingt sind. Ebenso weist die Nierenfunktion eine "circadiane Periodik" auf,

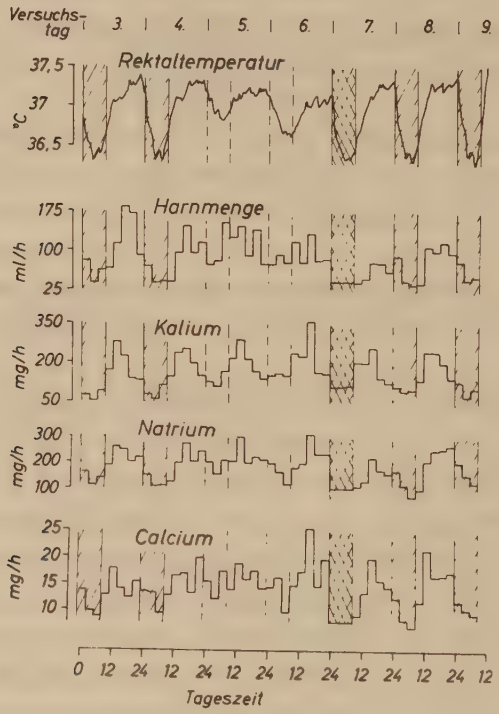

Abb. 10
Physiologische Parameter. Mittelwert der absoluten Meßwerte von 12 VPn.. Der Verlauf der Rektaltemperatur ist kontinuierlich registriert worden. Harn- und Elektrolytmengen sind in dreistündigem Abstand gemessen und als Menge pro Stunde angegeben. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

wenn auch mehr Unregelmäßigkeiten im Tagesverlauf auftreten als bei der Rektaltemperatur (s. Harn- und Elektrolytmengen, Abb. 10). Die relativ großen, nicht periodischen Schwankungen in diesen Kurven sind unter anderem wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß weder Menge, noch Zusammensetzung der Nahrung der VPn. standardisiert worden sind.

2.3. 24-Stunden-Gleichwerte

Abbildung 11 zeigt, wie sich im Verlauf der Versuchsserie der 24-Stunden-Gleichwert (Mittelwert von jeweils acht Testterminen eines 24-Stunden-Abschnittes) verändert. Während die Werte der objektiven Tests relativ nahe beieinander liegen, verläuft die subjektive Einschätzung weit außerhalb dieses Bereiches. Nur bei den Rechentests steigen die Gleichwerte in den ersten 3,5 Tagen deutlich an. Zur gleichen Zeit schätzen die VPn. ihre eigene Verfassung ebenfalls wachsend positiv ein. Die übrigen Parameter halten zunächst ein nahezu gleichbleibendes Niveau ein. Ein Abfall der Leistung während der LL-Tage drückt sich am stärksten im Konzentrationsleistungstest und Durchstreichtest aus, etwas geringer in der Reaktionsgeschwindigkeit und dem Pauli-Rechentest. Noch geringer ist die Wirkung der Schlaflosigkeit auf die übrigen Tests. Völlig abweichend hiervon verhält sich wieder die Selbsteinschätzung, am deutlichsten die der Müdigkeit, die am zweiten LL-Tag mehr als 50% größer (entspricht -50% in Abbildung 11) als im Gesamtmittel eingeschätzt wird und damit weit unter den objektiven Tests liegt. Nach einer durchschlafenen Nacht erreichen alle Parameter wieder das Ausgangsniveau und steigen am folgenden Tag sogar weiter an. Am stärksten zeigt sich diese Tendenz beim Konzentrationsleistungstest und an der Art der subjektiven Einschätzung der Müdigkeit (zunehmend wach).

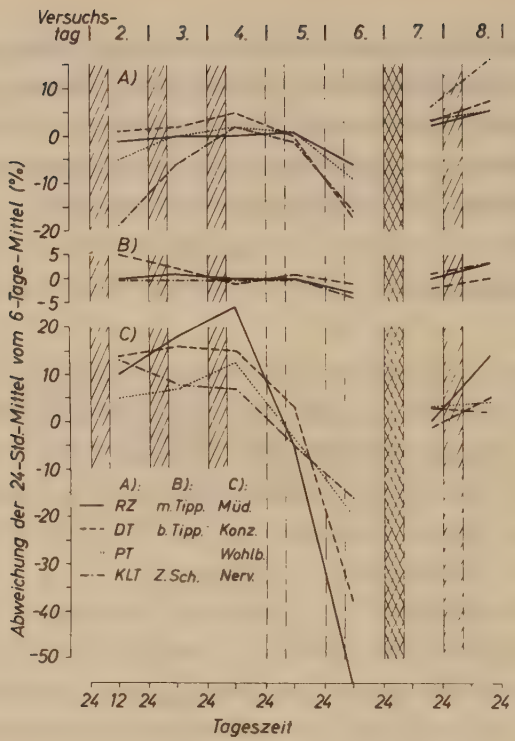

Abb. 11
24-Stunden-Gleichwerte. Verlauf des Mittelwertes von jeweils acht Testterminen eines 24-Stunden-Abschnittes, dargestellt als Abweichung vom Sechs-Tage-Mittel (= 0%). A) Psychologische Leistungstests, RZ: Reaktionszeit, DT: Durchstreichtest, PT: Pauli-Rechentest, KLT: Konzentrationsleistungstest; B) motorische und psychologische Tests, m.Tipp.: maximale Tippgeschwindigkeit, b.Tipp.: bevorzugte Tippgeschwindigkeit, Z.Sch.: Zeitintervall-Schätzung; C) Selbsteinschätzung, Müd.: Müdigkeit, Konz.: Konzentrationsfähigkeit, Wohlb.: körperliches Wohlbefinden, Nerv.: Nervosität. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

2.4. Vergleich der drei Versuchsbedingungen $(LD)_1$, (LL) und $(LD)_2$

Die Mittelwertskurven in Abbildung 7, 8 und 9 zeigen innerhalb des periodischen Verlaufes immer noch zufällig verteilte Schwankungen. Diese wirken

sich störend auf den Vergleich des Meßergebnisse unter den verschiedenen Versuchsbedingungen aus. Zur Glättung der Kurven wurden die Werte von jeweils zwei Tagen gleicher Versuchsbedingungen gemittelt (Abb. 12 und 13). Für die Darstellung der Abbildung 14, in der die Tagesgänge im LL mit denen im LD verglichen werden, sind die Ergebnisse von $(LD)_1$ und $(LD)_2$ für gleichartige Parameter in einer Kurve zusammengefaßt.

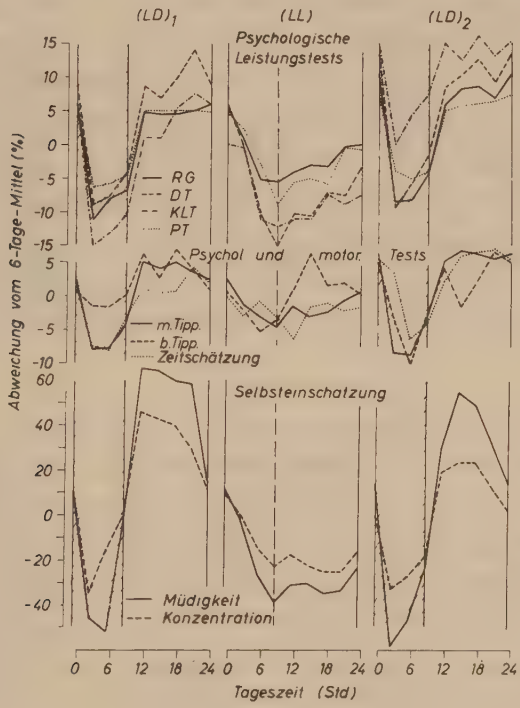

Abb. 12
Psychologische Parameter. Gemittelter Kurvenverlauf von jeweils zwei 24-Stunden-Abschnitten gleicher Versuchsbindung. $(LD)_1$: 3. und 4. Versuchstag (Licht-Dunkel-Wechsel); (LL): 5. und 6. Versuchstag (Schlafentzugsperiode; $(LD)_2$: zweite Hälfte des 7., 8. und erste Hälfte des 9. Versuchstages (Licht-Dunkel-Wechsel). Dunkelzeiten mit zweimaliger Unterbrechung sind Schraffiert, die entsprechenden Zeitabschnitte während der Schlafentzugsperiode (LL) durch unterbrochene senkrechte Striche gekennzeichnet. Bezeichnung der Tests vgl. Abb. 11.

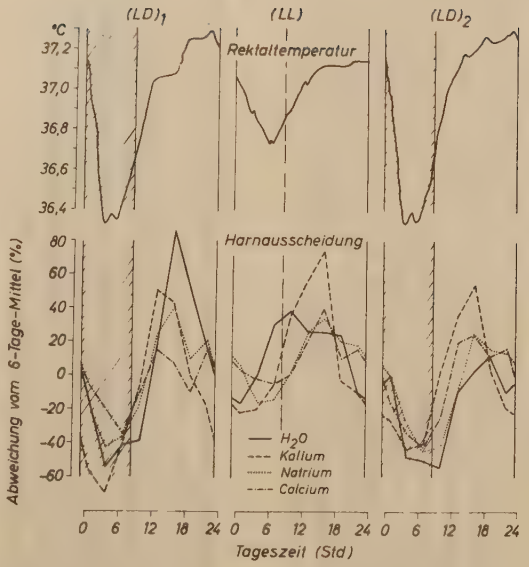

Abb. 13
Physiologische Parameter. Gemittelter Kurvenverlauf von jeweils zwei Tagen gleicher Versuchsbedingung. Bezeichnungen der Versuchsabschnitte vgl. Abb. 12.

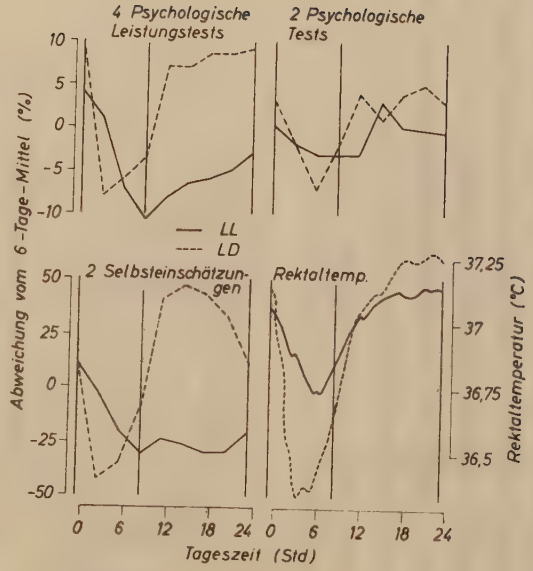

Abb. 14
Psychologische Parameter und Rektaltemperatur. Werte von mehreren gleichartigen Parametern unter gleichen Versuchsbedingungen sind in einer 24-Stunden-Kurve zusammengefaßt. LL: (——) Schlafentzugsperiode, 5. und 6. Versuchstag; LD: (---) Versuchsabschnitt mit Schlafen und Wachen, 3., 4., 7., 8. und 9. Versuchstag.

In den Abbildungen 12 und 14 ist die starke Abhängigkeit der Leistung von der Tageszeit klar erkennbar. Bei $(LD)_1$ wie bei $(LD)_2$ ist die Leistung während des Tages um ca. 15% besser als in der Nacht. Im Verlauf des Tagesplateaus schwanken die Leistungen nur um ca. ± 2%. Obwohl zu den Testterminen um 2, 5 und 8 Uhr in gleicher Weise unmittelbar nach dem Wecken getestet worden ist, steigt die Leistung bereits zum 5-Uhr- und noch stärker zum 8-Uhr-Test an. Die Leistung bei $(LD)_2$ liegt im Mittel um ca. 5% höher als bei $(LD)_1$. Auch im LL zeigt die Leistung eine Beziehung zur Tageszeit, trotz Abnahme des Gleichwertes (Abb. 11) und der Schwingungsbreite (Tab.1). Die maximale Tipp-Geschwindigkeit, die bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit und die Zeitintervall-Schätzung ergeben ein ähnliches Bild (Abb. 12 und 14). Stärker ausgeprägt als bei den Leistungstests ist die gegenüber $(LD)_1$ im LL verringerte Schwingungsbreite, wie auch deren Vergrößerung bei $(LD)_2$ (Tab. 1). Auch wird die Periodik im LL relativ unstabil. Abnahme des Gleichwertes und der Schwingungsbreite sind bei der Selbsteinschätzung (Abb. 12 und 14) so groß, daß der periodische Tag-Nacht-Unterschied fast vollständig verschwindet.

Anders als bei den psychologischen Leistungstests sinken die Werte der gemessenen physiologischen Parameter unter Schlafentzugsbedingungen nicht ab (Abb. 13); die 24-Stunden-Gleichwerte der Rektaltemperatur und der Harnausscheidung sind [illegible] im LL angehoben. Vom ersten zum zweiten LL-Tag nimmt der Gleichwert der Rektaltemperatur jedoch wieder geringfügig ab, während die ausgeschiedene Elektrolytmenge eine ansteigende Tendenz zeigt. Ebenso wie bei den psychologischen Parametern ist die Schwingungsbreite beider Größen im LL verringert. Das beruht im Wesentlichen darauf, daß (anders als bei den psychologischen Parametern) die Minima gegenüber der LD-Zeit angehoben sind, wie an der Rektaltemperatur in den Abbildungen 13 und 14 deutlich zu sehen ist. Diese Tatsache trägt dazu bei, daß die Korrelation der Rektaltemperatur zu den psychologischen Leistungstests im LL relativ gering wird (Tab. 2).

Bei der Betrachtung der Leistungstestkurven (Abb. 12 und 14) fällt auf, daß

an den LL-Tagen die Minima um zwei Testtermine gegenüber den LD-Tagen verschoben sind. Dies deutet auf eine Verzögerung des gesamten Kurvenverlaufs hin. Es erscheint jedoch unzulässig, bei einer unsymmetrischen und unregelmäßigen Kurve von der Lage eines einzelnen Punktes auf die Phasenlage der gesamten Kurve zu schließen. Deshalb wurden die Kurven durch das Rechenverfahren der harmonischen Analyse einer Sinuskurve angeglichen und deren Phasenlage zum Vergleichen verwendet. Nach dieser Methode wurde die Phasenlage für jeden Parameter jeder VP. unter LD- und unter LL-Bedingung bestimmt. Gleichartige Parameter wurden in Gruppen zusammengefaßt. Abbildung 15 zeigt die Häufigkeitsverteilung dieser Phasenlagen.

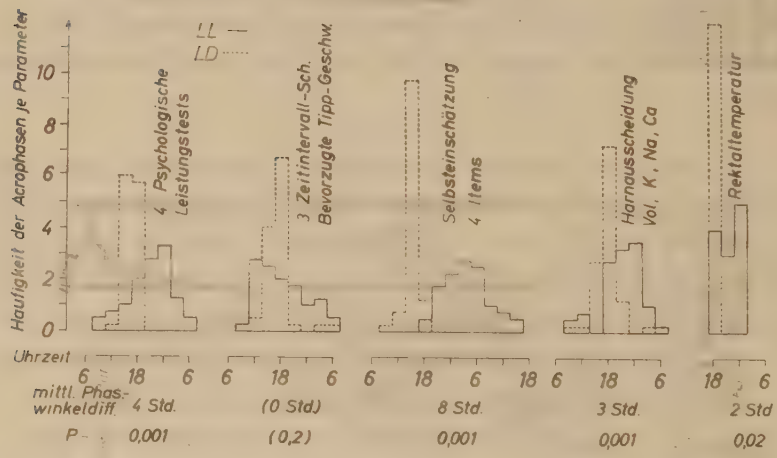

Abb. 15
Häufigkeitsverteilung der Acrophasen der durch harmonische Analyse einer Sinuskurve angeglichenen Meßwerte. —— Verteilung unter Schlafentzugsbedingung, ---- Verteilung bei Licht-Dunkel-Wechsel; p = Signifikanzniveau der Differenz der beiden Phasenverteilungen.

Diese Darstellung macht keine Aussage über die Lage des Maximums oder Minimums der gemessenen Kurven, sondern gibt die Lage der Acrophase der errechneten Sinuskurve an. Auffällig ist, daß die Phasenlagen aller Parameter unter LL-Bedingung eine wesentlich breiter gestreute Häufigkeitsverteilung aufweisen als unter LD-Bedingung. Zur Beantwortung der Frage, ob im Mittel die LL-Phasen sich signifikant von den LD-Phasen unterscheiden, wurde der t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Für die psychologischen Leistungstest ergab sich, daß der Mittelwert der LL-Phasen mit einer Signifikanz von $p = 0,001$ um ca. 4 Stunden gegenüber dem der LD-Phasen verschoben ist. Bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit und Zeitinervall-Schätzung weisen keinen signifikanten Phasenunterschied auf. Für die Selbsteinschätzung beträgt er ca. 8 Stunden, für die Menge und Elektrolytkonzentration des Urins 3 Stunden, beide mit einer Signifikanz von $p = 0,001$, und für die Rektaltemperatur 2 Stunden mit $p = 0,02$. Vergleicht man die Minima der Kurven in Abbildung 13, 14 miteinander, so scheinen im LD die psychologischen Parameter eine positive Phasenwinkeldifferenz zu den physiologischen Parametern zu haben. Dies entspricht auch dem Befund der harmonischen Analyse. Die Acrophase der Harnausscheidung liegt ca. 1 Stunde, die der Körpertemperatur ca. 2 Stunden später als die der psychologischen Leistungstests. Im LL ist dieses Verhältnis scheinbar umgekehrt. Nach der harmonischen Analyse liegt jedoch auch hier die Acrophase der physiologischen Parameter später als die der psychologischen. Allerdings vermindert sich deren Abstand auf ca. 0,5 Stunden.

3. Diskussion

3.1. Interindividuelle Streuung der Leistung, Leistungsabfall und Erholung

Vergleicht man die interindividuelle Leistungsstreuung (Abb. 6, Tab. 1) bei den psychologischen Leistungstests mit dem Leistungsabfall in den gleichen Tests während der Schlafentzugszeit (Abb. 11), so scheinen beide Größen

miteinander in Beziehung zu stehen. Tests mit geringer Leistungsstreuung weisen einen geringen Leistungsabfall auf (Reaktionsgeschwindigkeit und Pauli-Rechentest), Tests mit großer Leistungsstreuung einen großen Leistungsabfall (KLT-Test und Durchstreichtest). Zum Beispiel sind beim KLT-Test Leistungsstreuung und -abfall ca. 3-mal so groß wie bei der Reaktionsgeschwindigkeit. Luby (32) erklärt zu den Ergebnissen seiner Schlafentzugsuntersuchungen, daß stark motivierende Aufgaben einen geringen, wenig motivierende einen großen Leistungsabfall bedingen. Entsprechend der oben beschriebenen Abhängigkeit von Leistungsstreuung und Leistungsabfall ließe sich hieraus der Schluß ziehen, daß stark motivierende Tests auch einen geringeren interindividuellen Leistungsunterschied aufweisen. Unterstützt wird diese Annahme durch den großen Unterschied (± 50%, Abb. 6) in der bevorzugten Tipp-Geschwindigkeit, da dieser Test keine Leistungsanforderung impliziert. Hierbei ist es den VPn. überlassen, nach eigenem Belieben die ihnen angenehmste Geschwindigkeit zu bestimmen, wogegen bei den übrigen psychologischen Tests ein Grenzwert (Maximale Leistung oder exakte Produktion eines bestimmten Zeitintervalles) erreicht werden soll. Daß die Selbsteinschätzung der Konzentrationsfähigkeit ca. doppelt so stark gestreut ist wie die der Müdigkeit (bei gleicher Skalenlänge), erklärt sich aus der Tatsache, daß zur Einschätzung der Konzentrationsfähigkeit die gesamte Strecke zwischen "groß" und "gering" ausgenutzt worden ist, während für die subjektive Bewertung der Müdigkeit in der Regel die Extreme der Skala bevorzugt worden sind. Dies macht sich ebenfalls in der unterschiedlichen Amplitude der beiden Selbsteinschätzungen bemerkbar.

Betrachtet man die Art der Aufgaben und den Schwierigkeitsgrad der einzelnen Tests, so erscheint die Aussage Kleitmanns (29), daß normale Routinearbeit wenig von Schlafentzug beeinflußt wird, naheliegender für die Erklärung des unterschiedlichen Leistungsabfalles als die motivierenden Eigenschaften der Tests (32). Sowohl die mechanische Reaktion auf optische Reize, als auch die Addition zweier einstelliger Zahlen könnte man als einfache Routinearbeit bezeichnen. Dagegen erfordert die relativ kompliziertere Aufgabenstellung des KLT-Tests (Addition und Subtraktion von 6 Ziffern, Merk- und Entschei-

dungsfähigkeit) eine hohe Konzentration, die unter Schlafentzugsbedingung nicht in demselben Maß aufgebracht werden kann. Der Durchstreichtest scheint eine sehr einfache Leistung zu verlangen, wurde jedoch von den VPn. übereinstimmend als der "unangenehmste" empfunden. Er stellt die VPn. offenbar unter einen erhöhten Stress, dem sie bei Schlafentzug nur mehr mangelhaft gewachsen sind, was den starken Leistungsabfall in diesem Test erklären könnte.

Daß die VPn. ihre eigene Kondition (Müdigkeit, Konzentrationsfähigkeit, körperliches Wohlbefinden, Nervosität) in den ersten Versuchstagen (auch wenn man die größere Amplitude im Tagesgang dieser Parameter berücksichtigt) besser einschätzen, als es ihren objektiven Leistungen entspricht (Abb. 11), könnte als Anpassung an die ungewöhnliche Anforderung dieses Versuchs gewertet werden (34). Zunächst müssen die VPn. sich selber "Mut zusprechen", erst gegen Ende der Schlafentzugszeit können sie ihre Müdigkeit vollständig zugeben. Offenbar wird der Organismus von zweitägiger Schlaflosigkeit nicht nachhaltig beeinträchtigt (42). Denn bereits nach einer durchschlafenen Nacht (8,5 Std.) erreichen die Testergebnisse das Niveau der Zeit vor dem Schlafentzug. Daß die Leistungen am zweiten Tag nach der durchschlafenen Nacht noch höher liegen, könnte auf ähnliche Weise durch das nahe Ende des Versuchs bewirkt worden sein (36) wie der Leistungsanstieg am Ende der Schlafentzugszeit (vgl. 3.2.).

3.2. Circadiane Periodik

Erwartungsgemäß sind die Ergebnisse der psychologischen Leistungstest unmittelbar nach dem Wecken schlechter als in vollem Wachzustand. Doch scheint unmittelbar vorausgegangener Schlaf nicht der einzige Einfluß auf die Leistung zu sein. Während die Tagesleistungen mehr oder weniger zufällig um ein Plateau schwanken, sind die Ergebnisse der 8^{00}-(Weck-) Tests (teils auch der 5^{00}-(Weck) Tests stets höher als um 2^{00}. Dieser Leistungsverlauf entspricht dem Verlauf vegetativer Funktionen und könnte als Folge von Zustandsänderungen während des Schlafes (28) erklärt werden. Die Testergebnisse

während der Schlafentzugszeit zeigen jedoch eindeutig, daß der Wechsel zwischen Schlafen und Wachen nicht notwendig ist zur Aufrechterhaltung der periodischen Schwankungen psychologischer Leistungen. Abgesehen von dem durch Mangel an Schlaf bedingten allgemeinen Leistungsabfall, entspricht auch in diesem Versuchsabschnitt die Leistungskurve dem Bild einer circadianen Periodik. Es stellt sich die Frage, was unter Schlafentzugsbedingungen den periodischen Anstieg der Leistung bewirkt, bzw. ihren Schwingungscharakter aufrechterhält. Da periodische Umwelteinflüsse ausgeschlossen worden sind, und da streng kontrolliert worden ist, daß die VPn. auch nicht kurzfristig eingeschlafen sind, da also die Leistungen täglich ohne erkennbaren Anlaß, spontan angestiegen und wieder abgefallen sind, muß angenommen werden, daß die Ursachen für diese periodischen Veränderungen psychologischer Leistungen im Organismus selbst liegen (1, 19, 27, 39, 40).

Betrachtet man den Organismus als ein System selbsterregter circadianer Oszillatoren (6, 37, 38), so könnte die von der Tageszeit abhängigen Leistungsänderungen Ausdruck eines solchen Oszillators sein. Daß die Amplituden der Leistungskurven während der Schlafentzugszeit abnehmen, widerspricht diesem Modell nicht. Denn ebenso vermindert sich die Amplitude der Rektaltemperatur, für die bereits in anderen Versuchen der Charakter eines selbsterregten, autonomen Oszillators nachgewiesen worden ist (2). Wie für die physiologischen entfällt auch für die psychologischen Parameter unter Schlafentzugsbedingungen der amplituden-verstärkende Effekt des Schlaf-Wach-Rhythmus (29). Überraschenderweise ist der Leistungsanstieg in allen vier psychologischen Leistungstests am zweiten LL-Tag ca. doppelt so groß wie am ersten LL-Tag. Unter der Annahme, daß die durch Schlafentzug bedingte Leistungsabnahme einem exponentiellen Trend entspricht und dieser bereits am zweiten LL-Tag sich einem neuen niedrigeren Niveau asymptotisch nähert, würde sich der relativ große Anstieg der Leistung am zweiten LL-Tag allein mathematisch aus der Überlagerung von Tagesgang und Trend ergeben. Möglicherweise bewirkt auch die Erwartung des nahen Endes der Schlafentzugszeit eine Zunahme der Motivation, obwohl die VPn. mit einer weiteren Nacht ohne Schlaf gerechnet haben. Ebenfalls denkbar ist ein in demselben Sinne

wirkender unbewußter Einfluß des Versuchsleiters, dem ja das tatsächliche Ende der Schlafentzugszeit bekannt gewesen ist. Gegen eine solche Deutung spricht, daß zu derselben Zeit kein entsprechend großer Anstieg in der Selbsteinschätzung erkennbar ist, obwohl zu erwarten ist, daß der oben beschriebene Einfluß sich hier am ehesten auswirkt.

Daß die Amplitude der Selbsteinschätzung (Müdigkeit, Konzentrationsfähigkeit, Abb. 9) ca. fünfmal so groß (im LD) ist wie die der Leistungstests, hat methodische Ursachen. Die VPn. sollten nach eigenem Ermessen ihr persönliches Befinden mit Hilfe einer begrenzten Skala bewerten. Erwartungsgemäß werden hierzu auch die Endpunkte der Skala benutzt, die bei der Umrechnung in Prozentwerte als + bzw. -100% erscheinen. Dagegen können die objektiven Leistungsergebnisse auf Grund physiologischer Bedingungen nicht auf das Doppelte (= +100%) der mittleren Leistung gesteigert werden (vorausgesetzt, daß die Motivationsstärke nur geringen Schwankungen unterworfen ist, was den Beobachtungen der Versuchsleiter entspricht). Ein Mindestmaß an Kooperation von Seiten der VPn. schließt auch eine "Null-Leistung" (= -100%) in den Tests aus. Das erklärt, warum die Amplitude der Leistungstests weitaus geringer ist als die der Selbsteinschätzung. Auch unter Schlafentzugsbedingungen ist bei der Selbsteinschätzung noch eine circadiane Periodik erkennbar, entsprechend Befunden von Murray und Pasnau (34, 35). Daß die Selbsteinschätzung lediglich die objektiven Testergebnisse widerspiegelt ist nahezu ausgeschlossen. Denn zum einen erhielten die VPn. keine objektive Information über Testergebnisse, zum anderen wurde der Selbsteinschätzungsbogen zu Beginn jedes Testtermins vorgelegt, sodaß die VPn. nicht soeben Geleistetes beurteilen, sondern nur ihre zu erwartende Leistungsfähigkeit abschätzen konnten.

3.3. Phasenlage der Periodik

Wegen der Asymmetrie der empirisch gewonnenen Kurven mit ihren distinkten Minima, aber schlecht bestimmbaren maximalen Scheitelpunkten (Tagesplateau), liegt es nahe, die Minima als Anhaltspunkt für die Bestimmung der

Phasenlage zu verwenden. Ein solches Verfahren ergibt jedoch irreführende Werte, wenn sich, wie im vorliegenden Fall, der Gleichwert stark ändert. Bei einer Sinuskurve mit überlagertem Trend kommt es bei unveränderter Periode und "Phasenlage" der Grundschwingung zu einer Verschiebung der Minima nach links, bzw. nach rechts gegenüber den Minima bei unverändertem Gleichwert; die Maxima verschieben sich in der Gegenrichtung. Der Betrag dieser Verschiebung ist allein eine Funktion der Steigung des Gleichwertes und der Amplitude. Die Rechtsverschiebung der Minima in den vorliegenden Versuchsergebnissen ließe sich allein durch diesen mathematischen Zusammenhang erklären. Eine realistischere Aussage über die Phasenlage erlaubt jedoch die hier angewandte Methode der harmonischen Analyse, die jeden Meßpunkt der Kurve berücksichtigt.

Die geringe Streuung der Phasenlage während der Kontrolltage (Abb. 15) ist bedingt durch den strengen Zeitplan des Schlafens und Wachens, dem die VPn. während dieser Zeit unterworfen gewesen sind. Die größere Streuung während der Schlafentzugszeit hat zum Teil methodische Ursachen. Bei geringerer Amplitude wirken sich zufällige, nicht periodenbedingte Schwankungen der Kurve stärker auf die Form und Lage der durch die harmonische Analyse errechneten Sinuskurve aus. Dennoch ergibt sich für fast alle Parameter eine signifikante Phasenverzögerung um mehrere Stunden (Abb. 15). Daß die Periode mit einer Tendenz zur Verlängerung frei zu laufen beginnt (14), kann nicht ausgeschlossen werden, ist jedoch wenig wahrscheinlich. Denn die VPn. waren zwar von periodischen Umwelteinflüssen isoliert, besaßen aber wegen der regelmäßig stattfindenden Tests genaue Kenntnis der Uhrzeit und hatten Kontakt mit den Versuchsleitern. In anderen Untersuchungen ist bereits nachgewiesen worden, daß für den Menschen der soziale Kontakt ein stärkerer Zeitgeber ist als der Licht-Dunkel-Wechsel (15, 20, 43, 48). Es ist anzunehmen, daß unter den gegebenen Versuchsbedingungen der Kontakt zu den Versuchsleitern zusammen mit der Kenntnis der Uhrzeit eine solche Zeitgeberfunktion ausübt.

Wahrscheinlicher sind zwei andere Ursachen: 1. Bei Dauerlicht und Schlaf-

entzug kann sich die externe Phasenbeziehung der circadianen Periodik zu dem eben beschriebenen Zeitgeber ändern, da dieser eine geringere synchronisierende Wirkung hat als die Summe aller Zeitgeber unter natürlichen Bedingungen. Ist die Spontanperiode des synchronisierten Organismus länger als die des Zeitgebers, wie es beim Menschen der Fall ist, so eilt, entsprechend dem theoretischen Schwingungsmodell, die abhängige Schwingung der Synchronisierenden nach. Das heißt, daß sich bei bestehender Synchronisation eine negative Phasenwinkel-Differenz der Periodik des Organismus zu den Zeitgebern einstellt. Fallen einige dieser Zeitgeber weg, im vorliegenden Fall in erster Linie der geregelte Schlaf-Wach-Wechsel, so wird erwartungsgemäß die negative Phasenwinkel-Differenz größer (8, 16, 46). 2. Schlafentzug könnte unmittelbar einen Einfluß auf den der Periodik zugrunde liegenden Oszillator ausüben, z.B. auf dessen Eigenfrequenz. Eine Abnahme derselben würde ebenfalls zu einer Zunahme der negativen Phasenwinkeldifferenz führen.

Geht man von der Hypothese aus, daß die psychologischen Leistungen, die Selbsteinschätzung und die physiologischen Parameter verschiedenen Oszillatoren zugeordnet sind, so ist auch erklärlich, warum Schlafentzug die Perioden der verschiedenen Parameter unterschiedlich stark verzögert (Abb. 15), bzw. warum die verschiedenen Parameter unterschiedlich stark auf Abnahme der Zeitgeberstärke reagieren. Da der Organismus eine gewisse Zeit benötigt, um eine neue konstante interne, wie externe Phasenbeziehung zu gewinnen (3, 45), ist es nicht erstaunlich, daß die Phasenlagen bei nur zweitägigem Schlafentzug noch stark gestreut sind. Die Bedingungen der Umwelt, wie auch physiologische, bzw. pathologische Zustände des Organismus beeinflussen also nicht nur die externe, sondern auch die interne Phasenbeziehung der einzelnen Oszillatoren zueinander (Phasenkarte; 9, 15, 16). Daß auch die vegetativen Funktionen, trotz nahezu konstantbleibenden Gleichwertes während der Schlafentzugszeit eine signifikante negative Phasenverschiebung (gegenüber $(LD)_1$) aufweisen (Abb. 15) unterstützt die Annahme, daß Schlafentzug die "Phasenkarte" des Organismus verändert (vgl. 2.4.). Die in Abbildung 7, 8 und 9 erkennbare Zunahme der interindividuellen Streuung im LL (s. Hüllkur-

ve) kann also zwei Ursachen haben: 1. eine Zunahme der Streuung der Leistungsergebnisse bei angenommener synchroner Phase aller VPn., 2. eine Zunahme der Phasenstreuung. Der 2. Fall ergibt, auch bei gleichbleibender Leistungsamplitude der einzelnen VPn., bei der Mittelwertskurve eine Verminderung der Schwingungsbreite.

Komplizierend bei der Deutung von Veränderungen des Kurvenverlaufes bei Schlafentzug kommt hinzu, daß noch nicht endgültig geklärt ist, wie stark geregelte Schlafzeiten Form und Phasenlage der Kurven anderer Parameter beeinflussen. Der strenge Zeitplan an den Kontrolltagen (Die VPn. sollten sich an die vorgeschriebenen Schlafzeiten halten.) könnte, im Sinne einer "Maskierung" der Periode (4), eine scheinbare positive Phasenverschiebung bewirkt haben, die bei ebenfalls bekannter Uhrzeit, aber frei gewählten Schlaf- und Wachzeiten nicht aufgetreten wäre. Danach könnte die negative Phasenverschiebung während der Schlafentzugszeit lediglich eine Aufhebung dieses "Maskierungseffektes" darstellen. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen läßt sich also nicht eindeutig klären, ob die hier empirisch festgestellte Verschiebung der Minima das Ergebnis einer echten Phasenkartenänderung darstellt.

3.4. Ursachen der circadianen Periodik psychologischer Leistungen

Es gibt mehrere Interpretationsmöglichkeiten für die in der vorliegenden Arbeit nachgewiesene Periodik psychologischer Leistungen: Sie könnte (1.) eine passive Folge der Umweltperiodik sein oder zumindest indirekt von dieser induziert werden; (2.) in einer rein kausalen Abhängigkeit vom Rhythmus vegetativer Funktionen stehen; oder (3.) Ausdruck eines eigenen schwingungsfähigen Systems sein, welches fremd- oder selbsterregt ist.

1. Das Andauern der periodischen Leistungsänderung an den LL-Tagen (konstante Versuchsbedingungen: Dauerlicht, gleichbleibende Raumtemperatur, Isolierung und Schlafentzug) beweist, daß der Rhythmus der Umwelt zur Auf-

rechterhaltung dieser Periodik nicht nötig ist. Eine indirekte Beeinflussung der psychologischen Leistungen durch Umweltfaktoren kann jedoch unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Denkbar ist, daß der soziale Kontakt zusammen mit der Kenntnis der Uhrzeit nicht nur eine Zeitgeberfunktion ausübt, sondern darüber hinaus den täglichen Leistungsanstieg fördert. Eine außengesteuerte periodische Motivationsänderung, bedingt durch die allgemein geltenden Vorstellungen über Aktivitäts- und Ruhezeiten im Tagesverlauf,könnte, verstärkt durch die Anwesenheit des Versuchsleiters und durch Beibehaltung alltäglicher Gewohnheiten (Einnahme der üblichen Mahlzeiten zu den entsprechenden Zeiten, morgendliches Waschen usw.), einen Druck auf die VPn. ausüben, der sie regelmäßig in den Vormittagsstunden, trotz egalisierender Wirkung von Dauerlicht und Schlafentzug, zu erhöhter Leistung anregt. Unbewußte Einflüsse der drei Versuchsleiter können jedoch nur wenig beigetragen haben, da sie sich in einem Acht-Stunden-Rhythmus abgelöst und daher unterschiedliche Schlaf- und Wachzeiten gehabt haben. Weder dieser Faktor, noch die oben genannte, denkbare Motivationsänderung der VPn. vermögen die auch unter Schlafentzug relativ große Stabilität der circadianen Periodik befriedigend zu erklären. In Versuchen von Levi (31) waren solche Einflüsse dadurch weitgehend ausgeglichen worden, daß die VPn. neben Schlafentzug einem über mehrere Tage ständig gleichbleibenden, hohen Leistungsdruck ausgesetzt waren, der von außen auf sie einwirkte. Dennoch ist neben einem periodischen Anstieg von Adrenalinabbauprodukten im Harn auch eine circadiane Periodik der Leistung festgestellt worden, die den hier vorliegenden Ergebnissen entspricht.

2. Durch den 63,5 Stunden dauernden kontrollierten Wachzustand ist ausgeschlossen worden, daß die periodischen Leistungsänderungen allein eine Funktion des Schlaf-Wach-Rhythmus sind. Inwieweit z.B. Körpertemperatur, Nierenfunktion oder andere nicht gemessene vegetative Funktionen einen unmittelbaren Einfluß auf psychologische Leistungen ausüben, kann durch diese Versuche nicht geklärt werden. Daß alllein durch die Periodik der Körpertemperatur gleichartige Veränderungen in der Reaktionsgeschwindigkeit bewirkt werden, ist zwar häufig postuliert worden (21, 22, 23, 30), kann jedoch nach Unter-

suchungen von Mann (33) als unwahrscheinlich betrachtet werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen ebenfalls, daß unter Schlafentzug einerseits die 24-Stunden-Mittel der Leistungen abnehmen, andererseits der Gleichwert der Rektaltemperatur angehoben ist, was die Korrelation zwischen diesen beiden Größen praktisch aufhebt (Tab. 2).

3. Die bisherigen Überlegungen sprechen gegen die Hypothese, daß die Periodik psychologischer Leistungen nur eine Reaktion auf periodische Veränderungen der Umwelt oder den Rhythmus körpereigener vegetativer Funktionen darstellt. Das berechtigt zu der Vermutung, daß die festgestellte circadiane Periodik Ausdruck eines schwingungsfähigen Systems ist. Ob dieses System die Eigenschaften eines autonomen selbsterregten Oszillators besitzt, oder durch einen anderen Oszillator fremderregt wird, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig entschieden werden. Ein Andauern der Periodik über zwei Tage bei konstanten Versuchsbedingungen (Dauerlicht, Schlafentzug usw.) reicht nicht aus, um die Selbsterregung nachzuweisen. Die in der periodischen Leistungsänderung sich äußernde Schwingung könnte vor Eintritt in die konstanten Lebensbedingungen der Schlafentzugszeit erregt worden, jedoch so wenig gedämpft sein, daß zwei Perioden noch nachweisbar sind (44). Andererseits laufen auch bei Fehlen des Schlaf-Wach-Rhythmus andere vegetative Parameter, wie z.B. Körpertemperatur und Nierenfunktion (Abb. 5), mit nahezu unveränderter Periode weiter und könnten neben einer synchronisierenden eine wenn auch schwächere schwingungserregende Wirkung auf die psychologischen Leistungen ausüben. Wie man am Beispiel der Rektaltemperatur sieht (vgl. 3.2. und Abb. 10), ist jedoch eine unter LL-Bedingungen verminderte Amplitude kein Beweis dafür, daß eine solche Schwingung nicht selbsterregt ist. Die Eigenständigkeit (Selbsterregung) circadianer Oszillatoren läßt sich nur dann nachweisen, wenn die normalerweise gekoppelten (synchronisierten) Oszillatoren unterschiedliche Frequenzen annehmen. Eine solche "interne Desynchronisation" (11, 12, 17) tritt nur unter bestimmten Versuchsbedingungen auf, die in den hier beschriebenen Versuchen nicht vorgelegen haben.

Wenn auch in dieser Arbeit nicht zwischen Selbst- und Fremderregung entschieden werden kann, so entsprechen die Ergebnisse jedenfalls der Hypothese, daß der Organismus ein System mehrerer unterschiedlicher Oszillatoren besitzt. Die einzelnen physiologischen und psychologischen Funktionen könnten untergeordneten Oszillatoren angehören, die je nach Zustand des Organismus in variabler Weise an übergeordnete Oszillatoren gekoppelt sind (Wever). Dafür spricht auch, daß sich unter Schlafentzug die Phasenbeziehung der circadianen Perioden der einzelnen Parameter zueinander ändert (vgl. 3.3.). Die Ergebnisse eigener Vorversuche (Abb. 16), die mit sechs VPn.

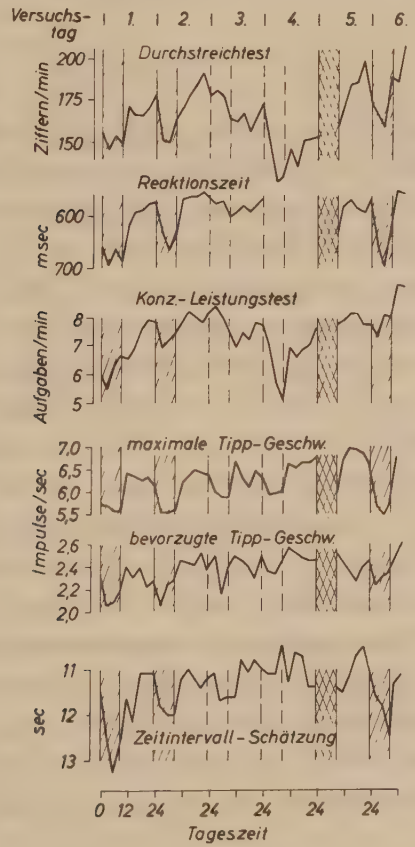

Abb. 16
Ergebnisse von Vorversuchen. Mittelwert der absoluten Meßwerte von sechs VPn. Einteilung der Schlaf- und Wachzeiten vgl. Abb. 3.

durchgeführt worden sind jedoch unter weniger strengen Versuchsbedingungen (die VPn. sind mehr unkontrollierten und zufälligen Einflüssen ausgesetzt gewesen), entsprechen vollständig den Befunden der vorliegenden Arbeit. Vergleicht man die Ergebnisse beider Versuchsserien und die gleichlautenden Befunde anderer Untersuchungen über Schlafentzug (25, 34, 35, 36, 31) mit der circadianen Periodik vegetativer Funktionen, deren Schwingungseigenschaft durch zahlreiche Versuche als hinreichend bewiesen gilt (2, 14, 47), so erscheint es außerordentlich wahrscheinlich, daß das Oszillatormodell auch für die circadiane Periodik psychologischer Leistungen zutrifft.

4. Zusammenfassung

An 18 männlichen Versuchspersonen im Alter von 20 bis 25 Jahren wurden über acht Tage in dreistündigem Abstand einige psychologische und physiologische Parameter (s. Methodik 1.2.) gemessen. Alle Meßgrößen wiesen bei geregeltem Schlaf-Wach-Rhythmus (8,5 Std. Dunkelzeit, 15,5 Std. Lichtzeit) eine circadiane Periodik auf. Auch bei Schlafentzug (63,5 Std. Wachzeit) unter völlig konstanten Lebensbedingungen (Abschirmung periodischer Umwelteinflüsse und Dauerlicht) blieb die circadiane Periodik erhalten, trotz teils drastischen Abfalls der Leistung in den psychologischen Tests. Die Schwingungsbreite war während dieser Zeit vermindert. Es ist anzunehmen, daß die Periodik der gemessenen psychologischen Parameter, wie die Periodik vegetativer Funktionen, Ausdruck eines schwingungsfähigen Systems ist. Während der Schlafentzugszeit trat eine für die Perioden der einzelnen Parameter unterschiedlich starke Phasenverzögerung gegenüber den Tagen mit Schlaf-Wach-Wechsel auf. Der Betrag dieser negativen Phasenverschiebung betrug je nach Funktion 2 bis 8 Stunden. Schlafentzug scheint also die "Phasenkarte" des Organismus zu verändern. Nachhaltige Wirkungen von zwei Nächten Schlafentzug konnten nicht beobachtet werden, denn alle gemessenen Parameter zeigten nach 8,5 Stunden nicht unterbrochenen Schlafes dasselbe Verhalten wie vor der Schlafentzugszeit.

5.1. Tabelle 1:	Mittelwert der absoluten Meßwerte von 12 VPn. über 6 Versuchstage	Schwingungsbreite in % d. Gesamt-Mittels $(LD)_1$	(LL)	$(LD)_2$	Mittlere interindividuelle Standardabw. der normierten Meßwerte in %
Reaktionszeit	0,66 sec/Reiz	16	8	18	6,3
Durchstreicht.	155,6 Ziff/min	23	19	23	10,0
Pauli-Rechent.	48,8 Aufg/min	11	10	13	6,0
Konzentrationsleistungst.	6,7 Aufg/min	25	7	16	11,0
Maximale Tipp-Geschw.	6,05 Imp/sec	13	7	16	5,5
Bevorzugte Tipp-Geschw.	2,49 Imp/sec	14	13	18	13,9
Zeitintervall-Schätzung	10,44 sec	12	6	14	10,0
Selbsteinschätz. Müdigkeit	4,4	118	32	112	30,0
Selbsteinschätz. Konzentration	5,1	80	20	56	33,0

5.2. Tabelle 2: Korrelation der einzelnen Parameter zueinander berechnet über die drei Versuchsabschnitte $(LD)_1$, (LL) und $(LD)_2$. Der Tabellenwert gibt die Dezimalstellen der Korrelationskoeffizienten an, in jedem Quadrat links oben für $(LD)_1$, rechts für (LL) und links unten für $(LD)_2$.

	DT	PRT	KLT	MTG	PTG	ZS	SEM	SEK	Temp.
Reakt.-geschw. (RG)	92 89 96	95 92 96	82 83 82	94 81 97	64 18 84	86 54 85	88 85 93	89 80 85	92 60 84
Durchstreich-Test (DT)		95 94 91	92 93 82	92 75 97	55 08 87	87 46 84	87 91 93	84 91 88	94 56 84
Pauli-Rechent. (PRT)			90 87 82	92 72 96	57 01 85	82 47 85	89 89 90	86 88 80	91 51 78
Konzentrationsleistungstest. (KLT)				78 63 83	44 04 74	77 41 63	72 91 77	69 91 77	86 47 50
Maximale Tipp-Geschw. (MTG)					72 15 39	88 36 86	92 71 95	92 66 90	91 50 82
Bevorzugte Tipp-Geschwindigkeit (BTG)						61 11 81	65 01 80	73 07 75	54 64 74
Zeitintervallschätzung (ZS)							83 47 83	79 43 70	90 29 80
Selbsteinschätzung der Müdigkeit (SEM)								95 96 95	86 41 82
Selbsteinschätzung der Konzentration (SEK)									80 44 76

6. Literaturverzeichnis

1. Aschoff, J. Exogene und endogene Komponente der 24-Std.-Periodik bei Mensch und Tier. Naturwiss. 42, 51-59 (1955)

2. - Tagesgang der Körpertemperatur beim Menschen. Klin. Wochenschr. 33, 545 (1955)

3. - Zeitliche Strukturen biolog. Vorgänge. Nov.Act.Leopold. Bd. 21 Nr. 143, 147-177 (1959)

4. - Exogenous and Endogenous Components in circadian Rhythms. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 25, 11-28 (1960)

5. - Comparative Physiology: Diurnal Rhythms. Ann.Rev. 25, 581-600 (1963)

6. - Biolog. Periodik als selbsterregte Schwingung. Arbeitsgem. für Forschung d. Landes Nordrhein-Westfalen, 138, 57-59 (1964)

7. - Survival Value of Diurnal Rhythms. Symp.Zool.Soc. London, 13, 79-98 (1964)

8. - The Phaseangle Difference in Circadian Periodicity. Circadian Clocks, North-Holland Publ.Comp.Amsterdam (1965)

9. - Human Circadian Rhythms in Activity, Body Temperatur and other Functions. Proc.VII, Int.Space Science Symp. Wien (1966)

10. - Physiologie biolog. Rhythmen. Ärztl. Praxis 18, 1569-1593 (1966)

11. - Desynchronisation and Resynchronisation of Human Circadian Rhythms. Aerospace Med. 40, (8), 844-849 (1969)

12. Aschoff, J.: Eigenschaften der menschlichen Tagesperiodik. Aktuelle Probleme der Arbeitsumwelt. Sonderdr. aus Arbeitsmed. Sozialmed. Arbeitshygiene Bd. 38, Stuttgart (1970)

13. - Gesetzmäßigkeit der biologischen Tagesperiodik. Dtsch.med. Wschr. 88, 1930 (1963)

14. - R., Wever: Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluß aller Zeitgeber. Naturwiss. 49, 337 (1962)

15. -, K.Klotter, R. Wever: Circadianer Wortschatz. Circadian Clocks, Amsterdam, North-Holland Publ.Comp. (1965)

16. -, U. Gerecke, R. Wever: Phasenbeziehung zwischen den circadianen Perioden der Aktivität und der Körpertemp. beim Menschen. Pflügers Arch. 295, 173-183 (1967)

17. -, U. Gerecke, R. Wever: Desynchronisation of Human Circadian Rhythms. Jap. J. Physiol. 17, 450 (1967)

18. -, E. Pöppel, R. Wever: Circadiane Periodik des Menschen unter Einfluß von Licht-Dunkel-Wechsel unterschiedlicher Periode. Pflügers Arch. 306, 58-70 (1969)

19. -, H. Giedke, E. Pöppel, R. Wever: Influences of Sleep-interruption and of Sleep-deprevation on Human Circadian Rhythms in Performance. Proc. NATO Symp. Strabourg (1970) im Druck

20. Bjerner, B. Swensson, A.: Schichtarbeit und Rhythmus. Acta med. scand. Suppl. 278, 102 (1954)

21. Colquhoun W.P., M.J.F.Blake, R.S.Edwards: Experimental studies on shift-work I: A Comparison of rotating and stabilized 4-hour-shift systems. Ergonomics 11, 437-453 (1968)

22. Colquhoun W.P., M.J.F.Blake, R.S.Edwards: Experimental studies on shift-work II: Stabilized 8-hour-shift systems. Ergonomics 12, 527-546 (1969)

23. - Experimental studies on shift-work III: Stabilized 12-hours-shift systems. Ergonomics 12, 865-882 (1969)

24. Edwards, A.S.: Effects of Loss of 100 Hours Sleep. AmJ. Physiol. 24, 167 (1941)

25. Fiorica, V.: Physiological Responses of Man during Sleep Deprevation. J. Appl. Physiol. 24, 167 (1968)

26. Frank, G., F.Halberg: Circadian Periodicity, Adrenal Corticosteroids and EEG of normal Man. J. Psychiat. Res. 4, 73-86 (1966)

27. Giedke, H.: Veränderungen der Tagesperiodik psychomotorischer Funktionen in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen. Diss. Med. München (1969)

28. Kleitmann, N.: Sleep and Wakefullness. Uni Press Chicago 215-229 (1963)

29. - The Effects of prolonged Sleeplessness on Man. Am.J. Physiol. 66, 67-92 (1923)

30. - Bodytemperature an Performance. J. Appl.Physiol. 3, 309-328 (1950)

31. Levi, L.: Physical and mental Stress Reactions during experimental Conditions simulating Combat. Särtryck ur Försvarsmedicin 2, 1-8 (1966)

32. Luby, E.D.: Sleep Deprevation: Effects on Behavior, Thinking, Motor Performance and biological Energy Transver Systems. Psychosom. Med. 22, 182 (1960)

33. Mann, H., J.Rutenfranz: The correlation of body-temperature and reaktion-time. Proc.Internat. Union Physiol. Scie. 9, 1088 (1971)

34. Murray, E.J.: Bodytemperature and Psychological Rating during Sleep Deprevation. J. Exp. Psychol. 56, 271-273 (1958)

35. Pasnau, R.O.: Psychnol. Effects of 205 Hours of Sleep Depriviation. Arch. Gen. Psychiat. 18, 496-505 (1968)

36. Patrick, G.T.W.: On the Effects of Loss of Sleep. Psychol. Rev. 3, 468-483 (1896)

37. Pittendrigh, C.S.: Circadian Rhythms and the circadian Organisation of living Systems. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 25, 159 (1960)

38. - V.G.Bruce: An Oscillator Model for biological Clocks. In: Rhythmic and synthetic Processes in Growth. Rudnik (ed.) Princeton Univ. Press, Princeton, 75 (1957)

39. Pöppel, E.: Oscillatorische Vorgänge in der menschlichen Zeitwahrnehmung. Diss. Phil. Innsbruck (1968)

40. -, J. Aschoff, H. Giedke: Tagesperiodische Veränderungen der Reaktionszeit bei Wahlreaktion. Z. experiment. u. angew. Psychol. 17, 537 (1970)

41. -, H. Giedke: Diurnal Variation of Time Perception. Psychol. Forsch 34, 182 (1970)

42. Robinson, E.S.: Effects of Loss of Sleep. J. Exper. Psychol. 5, 19-32, 93-100 (1922)

43. Rutenfranz, J.: Arbeitsphysiolog. Aspekte der Nacht- und Schichtarbeit. Socialmed., Arbeitshygiene 2, 17 (1967)

44. Wever, R.: Pendulum versus Relaxation Oscillation. Circadian Clock, North-Holland Publ.Comp. Amsterdam (1965)

45. - The Duration of Re-entrainment of Circadian Rhythms after Phase Shifts of the Zeitgeber. J. Theoret. Biol. 13, 187 (1966)

46. - Das Schwingungsgesetz der biolog. Tagesperiodik. Umschau in Wiss. u. Techn. 14, 462 - 469 (1966)

47. - Autonome circadiane Periodik des Menschen unter Einfluß verschiedener Beleuchtungsbedingungen. Pflügers Arch. 306, 71-91 (1969)

48. - Zur Zeitgeber-Stärke eines Licht-Dunkel-Wechsels für die circadiane Periodik des Menschen. Pflügers Arch. 321, 133 (1970)

49. Wilkinson, R.T.: Effects of up to 60 Hours Sleep Deprevation on different Types of Work. Ergonomics 7, 175 (1964)

Lebenslauf

Am 12.6.1944 wurde ich als Sohn des Dipl. Ingenieur Karl Ringer und seiner Frau Marie Christiane, geb. Rhenius in Nürnberg geboren. Nach vierjährigem Volksschulbesuch in Hamburg ging ich 1954 in die U.S.A., wo ich vier Jahre lang die amerikanische High School besuchte. 1958 kehrte ich nach Deutschland zurück und bestand 1965 das Abitur am Gymnasium für Jungen in Hamburg-Blankenese. Mein Medizinstudium begann ich 1966 in München und legte 1969 das Physikum ab. Im Frühjahr und Sommer 1970 führte ich die Versuche zu der vorliegenden Arbeit am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Erling-Andechs durch. 1972 bestand ich das medizinische Staatsexamen an der Universität München.